

DER KLIMAWANDEL IN HISTORISCHER ZEIT

Heinz Wanner, Bern

1. Einleitung

Zu Beginn soll der Begriff „historisch“ eingegrenzt werden. Wir verstehen ihn hier als die Zeitperiode, in der sich die Randbedingungen des Klimasystems nicht mehr dramatisch verändert haben. Abbildung 1 zeigt die Meeresspiegelveränderungen in der südlichen Nordsee während der letzten 10 000 Jahre, wie sie von Karl-Ernst Behre vom Niedersächsischen Institut für Küstenforschung ermittelt wurden. Daraus ist ersichtlich, dass die Abschmelzprozesse im Bereich der großen Eisschilder, vor allem auf den Nordkontinenten Amerika und Eurasien, um zirka 6000 Jahre vor heute zum größten Teil abgeschlossen waren. Damit haben wir die Gewähr, dass größere Reorganisationen im Klimasystem, vor allem in Form von Veränderungen der thermohalinen Zirkulation im Ozean, bisher ausgeblieben sind. In diese Phase der letzten 6000 Jahre fällt zudem der starke Wandel mit dem Übergang von den Jägern und Sammlern zur Sesshaftigkeit und schließlich zum modernen Gesellschaftssystem. Wir beschränken uns deshalb auf diesen Zeitabschnitt, der neben der historischen auch einen Teil der prähistorischen Zeitskala umfasst.

Durch welche dynamischen Vorgänge wurde die Klimadynamik dieser letzten 6000 Jahre bestimmt? Abbildung 2 versucht, das Zusammenwirken der wichtigsten Prozesse in Form eines heuristischen Wirkungsgefüges darzustellen. Die obersten zwei Felder enthalten einerseits die wichtigen Antriebs- oder Störfaktoren der Erdenergiebilanz, eingeteilt in natürliche und anthropogene Einflüsse, sowie die zwei wichtigsten Modi der internen Systemvariabilität (El Niño Southern Oscillation ENSO, Nordatlantische Oszillation NAO). Mit dem mittleren Balken soll dargestellt werden, dass die Schwankungen der Antriebsfaktoren zu komplexen Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen des Klimasystems, aber auch mit den Elementen der internen Systemdynamik führen. Die daraus resultierenden Prozesse sind es dann, die insgesamt die Zirkulationsmuster und die individuellen Wetterabläufe erzeugen, deren Summeneffekt oder deren Integral dann das Klima einer Region oder des ganzen Globus darstellt. Wir möchten uns in der Folge an diesem Schema orientieren. Im Vordergrund steht zuerst die Diskussion des Einflusses der natürlichen Antriebsfaktoren sowie der internen Systemvariabilität

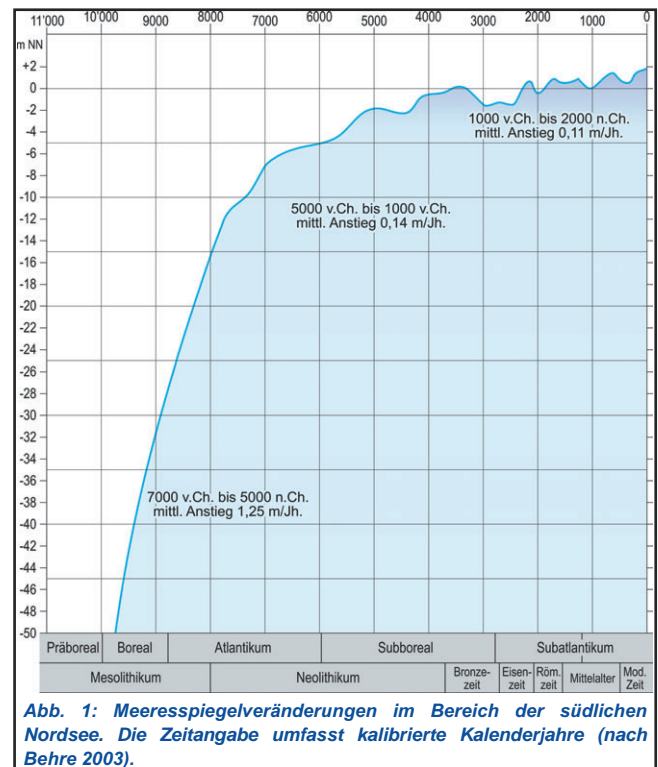


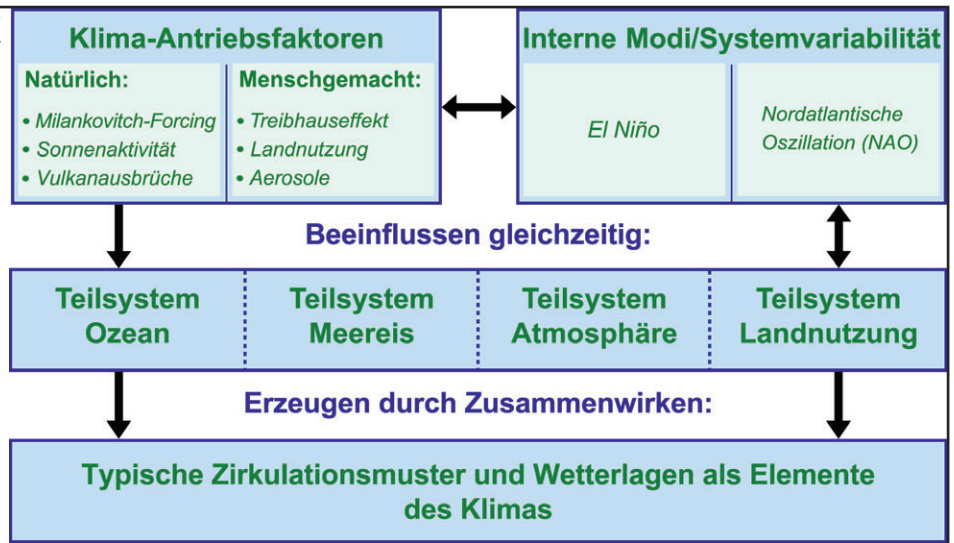
Abb. 1: Meeresspiegelveränderungen im Bereich der südlichen Nordsee. Die Zeitangabe umfasst kalibrierte Kalenderjahre (nach Behre 2003).

auf den Zeitskalen von Tausenden von Jahren bis Dekaden. Erst am Schluss wird im Sinne einer Überleitung zu den nächsten Abschnitten die Frage nach der Bedeutung der menschgemachten Faktoren gestellt.

2. Der globale Klimawandel auf der Skala von Jahrtausenden

Auf der längeren Zeitskala von Jahrtausenden wird der Klimawandel, abgesehen von internen Systemschwankungen, stark durch die Veränderung der Erdbahnelemente Exzentrizität, Schiefe der Erdachse und Präzession bestimmt, auch bekannt unter dem Begriff Milankovitch-Forcing (Abbildung 2). Weil diese Schwankungen aus quantitativer Sicht vor allem durch die Sommermonate bestimmt werden und weil die Festlandgebiete thermisch rascher reagieren als die trägen Ozeane, werden in Abbildung 3 die Insolationswerte des borealen Sommers (also des Sommers der kontinental dominierten Nordhalbkugel) mit denjenigen des australen Sommers (Sommer der südlichen oder Ozeanhalbkugel) verglichen. Wir erkennen, dass das Strahlungsangebot bis etwa 5000 Jahre vor heute während der Südhalbkugelsommer größer war als im Norden. Anschließend kreuzen sich die Kurven, das heißt, die Verhältnisse kehrten sich gerade um. Zudem waren die jahreszeitlichen

Abb. 2: Wirkungsgefüge: Darstellung des Klimawandels in der Form der Veränderungen des Strahlungsantriebes, der internen Systemdynamik, der Beeinflussung des Klimasystems (inkl. seiner Teilsysteme) sowie der daraus resultierenden Entstehung von Regional- und Lokalklimaveränderungen.



Schwankungen auf der Nordhalbkugel sehr groß.

Sowohl aus Klimaarchiven wie Pollen, Sedimenten, Eisbohrkernen, Baumringen, Stalagmiten, usw. als auch aus Modellrechnungen von globalen Klimamodellen können wir ableiten, dass diese Umverteilung des Energieangebots zu einer Verschiebung der Zirkulationssysteme und zu Veränderungen des Wärme- und Feuchteregimes geführt haben. In Abbildung 4 wird versucht, diese Veränderungen aufgrund der verfügbaren Klimaarchive für die Zeit vor etwa 6000 Jahren und für das Ende der vorindustriellen Periode darzustellen (Wanner et al. 2007). Die Abbildung wurde aufgrund der verfügbaren Klimaarchive sowie der existierenden Modellrechnungen entworfen. Die Bilder stellen deshalb eine erste Näherung dar und sind diskutierbar. Abbildung 4a stellt die Situation des Mittelholozäns um 6000

Jahre vor heute dar. Das höhere Insolationsangebot der Nordhalbkugel bewirkte vor allem im Sommer eine markante Erwärmung der Nordkontinente. Damit verbunden war eine Ausdünnung und Verkleinerung der Fläche des arktischen Meereises, was aufgrund der verminderten Reflexion der Solarstrahlung zu einer zusätzlichen Erhöhung der Mitteltemperaturen führte (Eis-Albedo-Wechselwirkung). Die mittlere Position der innertropischen Konvergenzzone (ITCZ) hatte sich nach Norden verschoben. Dies ermöglichte eine Verstärkung der Monsune der Nordhalbkugel, vor allem in Afrika und in Asien. Die Anomalien der Meeresoberflächentemperaturen des Pazifiks zeigten eher positive Werte im westpazifischen und negative im südostpazifischen Raum. Dies trug mit dazu bei, dass die Frequenz des El Niños vor 6000 Jahren wahrscheinlich relativ tief war und anschließend

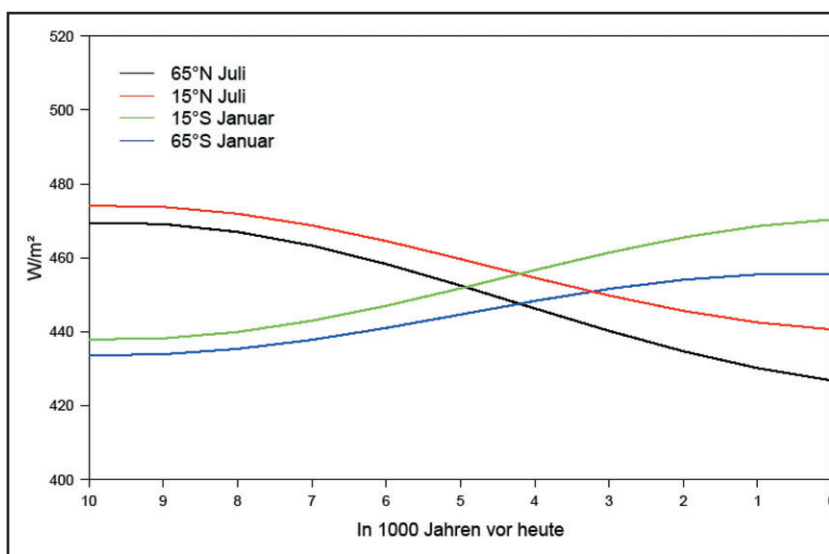
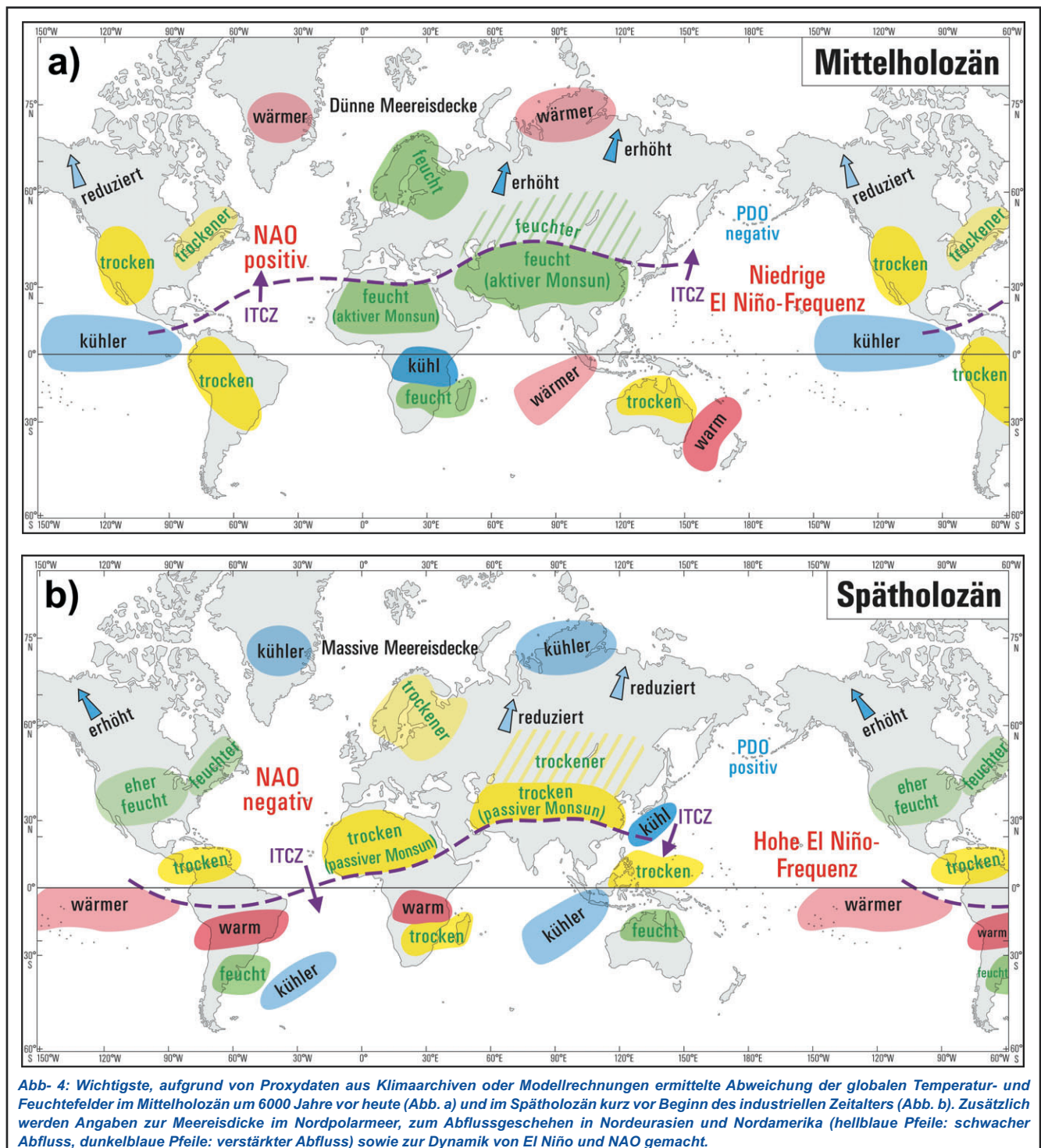


Abb. 3: Erdbahnbedingte Veränderung der Einstrahlung durch die Sonne (sogenanntes Milankovitch-Forcing) während der letzten 10 000 Jahre. Dargestellt sind die Kurven für 65° und 15° Nord und Süd, jeweils für die Sommermonate der entsprechenden Halbkugel.

sukzessive anstieg. Damit verbunden waren negative Anomalien des Feuchtefeldes im Südwesten Nordamerikas und entlang einer trockenen Diagonale vom Nordwesten zum Südosten Südamerikas sowie positive Feuchteanomalien in Südafrika. Im Raum des Nordatlantiks stellt sich die Frage, ob die Indizes

der Nordatlantischen Oszillation 6000 Jahre vor heute tatsächlich positivere Werte annahmen wie dies von Norel Rimbu und Kollegen von der Universität Bremen postuliert wird. Damit wären erhöhte Niederschläge und Abflüsse im Norden Eurasiens verbunden gewesen. In Abbildung 4b wird versucht, die Verhältnisse am



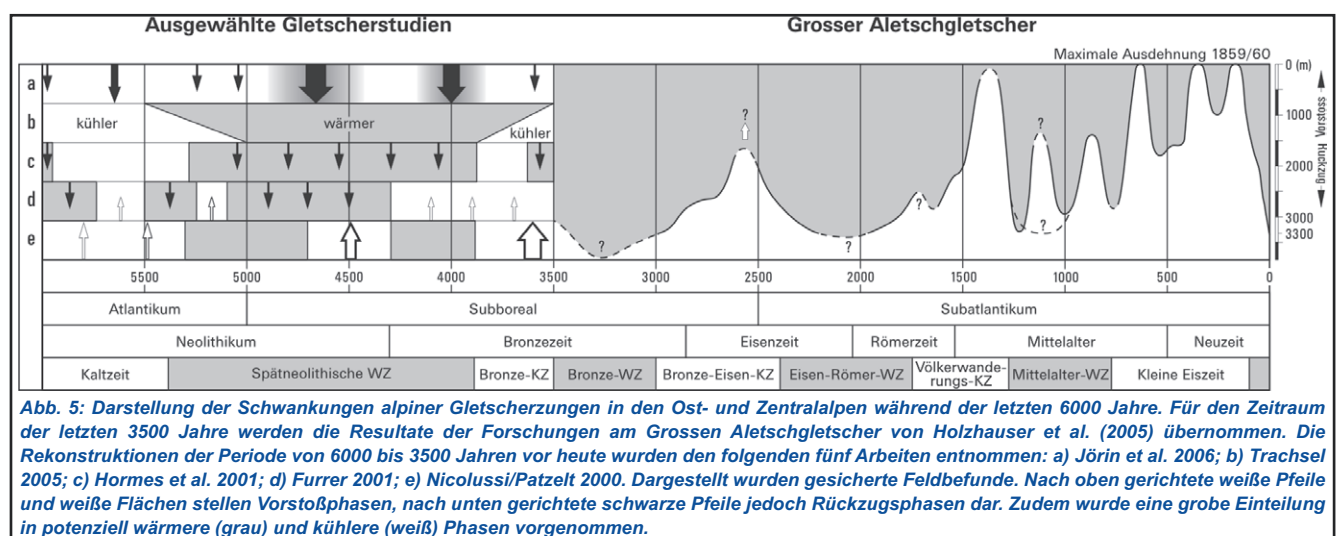
Mit diesen auf langer Zeitskala betrachteten Strukturen und Prozessen des mittel- bis spätholozänen Klimawandels wurde sozusagen der Hintergrund oder die Kulisse für den Klimawandel auf der höherfrequenten Zeitskala von Dekaden bis Jahrhunderten geschaffen. Dieser soll im nächsten Abschnitt diskutiert werden.

3. Der globale Klimawandel auf der Skala Dekaden bis Jahrhunderte

Ein wichtiges Ziel von Klimarekonstruktionen besteht

nicht nur darin, eine möglichst hohe Präzision der geschätzten Klimaparameter Geopotenzial, Temperatur oder Niederschlag zu erzielen. Erwünscht ist auch eine möglichst hohe zeitliche Auflösung. Im optimalen Fall wäre dies jährlich bis jahreszeitlich. Je kleiner die betrachtete Region ist, umso größer wird in der Regel auch die Amplitude der geschätzten Klimaschwankungen. Zielen wir darauf ab, Schwankungen auf der dekadischen bis hundertjährigen Skala zu erkennen, so bieten sich unter anderem die Veränderungen der Massenbilanz oder der Längenausdehnung von Gletschern an. Allerdings müssen wir uns bewusst sein, dass die Gletscher individuell unterschiedlich auf die Summeneffekte der Temperatur- und Niederschlagsschwankungen reagieren, und dass je nach Größe des Eismassenstromes und der Geometrie des Untergrundes ganz unterschiedliche Zeitverzögerungen auftreten können.

Abbildung 5 zeigt ein grobes Abbild der Zungenlängenänderungen wichtiger Gletscher im Europäischen Alpengebiet. Sie wurde aufgrund verschiedener Rekonstruktionen in den Ost- und Zentralalpen erstellt (siehe Figurenlegende). Die Abbildung liefert ein ungefähres Bild der abgelaufenen Prozesse und kann die Veränderungen der Massenbilanz nur grob andeuten. Anhand der grauen Felder, die in Rückschmelzphasen größere Flächen einnehmen, lassen sich die wärmeren oder die für die Massenbilanz ungünstigen Perioden wie zum Beispiel die spätneolithische Warmzeit oder die Bronze-, die Eisen-Römer- und die Mittelalter-Warmzeit abgrenzen. Die weißen Flächen markieren gletschergünstige, in der Regel kühlere und schneereichere Vorstoßphasen. Sie werden gegen das Spätholozän immer markanter. Als besonders deutliche Phasen mit Gletscherwachstum zeichnen sich die Völkerwanderungszeit sowie die Kleine Eiszeit ab.



In Abbildung 6 wird versucht, die verantwortlichen Antriebs- oder Betragsschwankungen der Erdoberflächenenergiebilanz innerhalb der Mittelbreiten der Nordhalbkugel in ihrer zeitlichen Abfolge während der letzten 6000 Jahre darzustellen. Dabei werden positiv gerichtete Energiebilanzanomalien oder erwärmende Einflüsse in roter, negative jedoch in blauer Farbe dargestellt. Die Milankovitch-Kurve lässt sich mit Software von André Berger von der Université catholique in Louvain (Belgien) berechnen. Die Gliederung der Solaraktivität basiert auf einer neuen Analyse von Jürg Beer von der ETH Zürich. Sie ist wie andere Kurven eine Schätzung. Grosse tropische Vulkanexplosionen sind als schwarze Linien eingetragen. Die von einem Team um Tom Crowley von der Duke University in Durham (USA) aufgrund von Eisbohrkernen in Grönland und in der Antarktis ermittelten Ereignisse sind noch relativ unsicher und werden hinterfragt. Was sich klar bestätigt hat ist, dass solche Vulkanereignisse für eine Periode von wenigen Jahren zu einem Rückgang der bodennahen Jahresmitteltemperatur führen können. Für Europa haben in unserer Berner Forschungsgruppe Erich Fischer und Kollegen in einer Studie über die letzten 500 Jahre zeigen können, dass diese Temperaturabnahme vor allem im Sommer deutlich wirksam wird. Die Winter sind nach Vulkanausbrüchen jedoch gekennzeichnet durch eine Verstärkung der Westwinde und zeigen – möglicherweise auch infolge der Strahlungswirkung des Vulkanaerosols – eine leichte Erwärmung.

Vergleichen wir die Abnahme der erdbahnbedingten Insolation in Abbildung 3 mit den in den Abbildung 5 stärker werden Gletschervorstößen des Spätholozäns, so darf auch aufgrund von Modellrechnungen

angenommen werden, dass die Alpengletscher zunächst deutlich auf die dadurch erzeugten positiven Temperaturanomalien reagiert haben, und dass der Similaunmann Ötzi vor grob 5000 Jahren am Ende dieser wärmeren Phase zu Tode kam und anschließend im Eis konserviert wurde. Betrachten wir jedoch in Abbildung 6 die möglichen Ursachen der kurzfristigeren Temperaturschwankungen auf der dekadischen bis säkularen Skala, so erkennen wir, dass die wärmeren und kühleren Zeitabschnitte sehr wohl einige Jahrhunderte dauern konnten. Der australische Forscher Barrie Hunt hat im Hinblick auf die Untersuchung derartiger Ereignisse eine Simulation über 10 000 Jahre durchgeführt, bei der er eine CO_2 -Konzentration von 330 ppm (heute stehen wir knapp über 380 ppm) vorgab und bei der die solare Aktivität konstant gehalten und keine Vulkaneruptionen vorgegeben wurden. Interessanterweise ergaben sich in der Simulation zwar regelmäßig Warm- und Kaltphasen. Das Modell war jedoch ohne die Störungen durch eine heruntergesetzte solare Aktivität (zum Teil erkennbar in einer tiefen Sonnenfleckenzahl) oder durch Vulkaneruptionen nicht in der Lage, Warm- oder Kaltphasen mit den beobachteten Phasen und Amplituden oder, einfacher ausgedrückt, der Intensität, Ausdehnung und der Länge der Eisen-Römer-Warmzeit oder der Kleinen Eiszeit zu reproduzieren. Auch aufgrund anderer Modellsimulationen müssen wir annehmen, dass diese über Jahrhunderte andauernden Ereignisse zumindest in spezifischen Fällen im Zusammenhang mit Einbrüchen der Solaraktivität und mit der Existenz von Gruppen mehrerer großer, tropischer Vulkanexplosionen stehen. Wenn wir diese Ereignisse in Abbildung 6 verfolgen, so stellen wir fest,

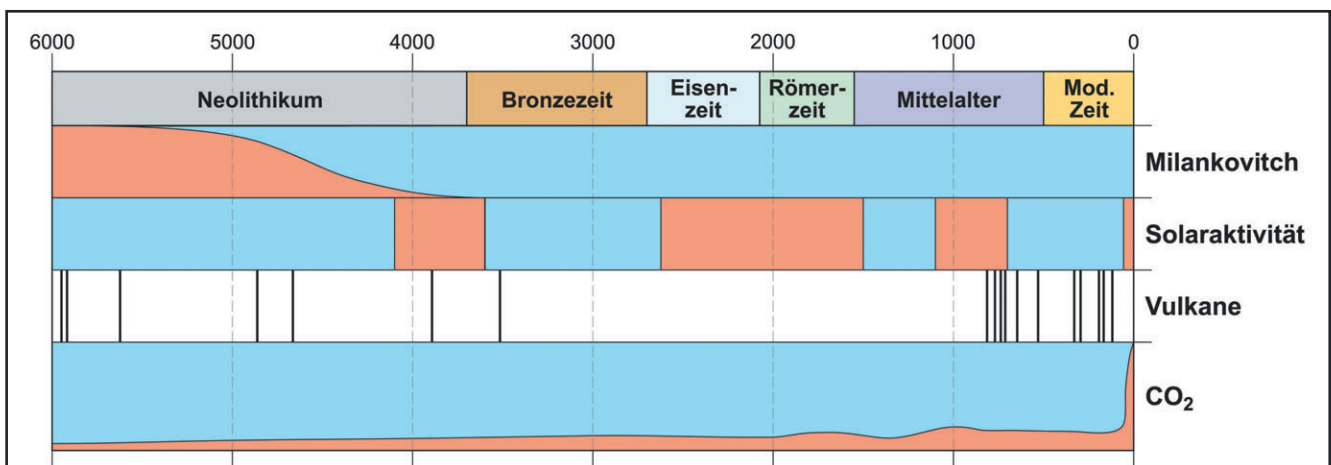



Abb. 6: Versuch einer Darstellung der für den Klimawandel mitverantwortlichen Antriebs- oder Schwankungseinflüsse aufgrund des momentanen Wissensstandes. Dargestellt sind (von oben nach unten): die prähistorisch-historische Zeitskala von Mitteleuropa, die solare Einstrahlungsintensität (Milankovitch-Forcing), die Perioden höherer (rot) und schwächerer (blau) Solaraktivität, die stärksten tropischen Vulkanexplosionen sowie die Mittelkurve der globalen CO_2 -Konzentration.



dass zur Zeit des Aletschgletscher-Rückzuges während der Eisen-Römer-Warmzeit (Abbildung 5) bei hoher Solaraktivität keine tropischen Vulkanexplosionen auftraten. Die Kleine Eiszeit des Mittelalters fiel jedoch nicht nur in die Periode eines erdbahnbedingten Insolationsminimums. Vielmehr traten in dieser markanten Kaltphase zusätzlich vier deutliche solare Aktivitätsminima (Wolf-, Spörer-, Maunder und Dalton-Minimum genannt) und eine Reihe von gewaltigen tropischen Vulkanexplosionen auf. Im Vordergrund standen die Eruptionen um 1258, 1600 und nach 1809 AD. Wir müssen uns deshalb die Frage stellen, ob die Kleine Eiszeit – zumindest in Europa – die kälteste Klimaphase der letzten 8000 Jahre darstellte.

Aus globaler Sicht besteht das Problem, dass wir vor allem in der Südhemisphäre nur über sehr wenig langfristige und hochaufgelöste Datenreihen verfügen. Die Frage, ob sich die oben genannten Warm- und Kaltphasen global ausgewirkt haben, ist deshalb schwierig zu beantworten. Für die Kleine Eiszeit scheint sich dies zu bestätigen. Bereits bezüglich der Mittelalter-Warmzeit (oder Mittelalterliche Wärmeperiode) herrschen Zweifel. Zumindest haben Ray Bradley aus Amherst (USA) und Kollegen zeigen können, dass die Spitzen dieser Erwärmung nicht überall zur gleichen Zeit aufgetreten sind. Wir überprüfen deshalb zurzeit in einem größeren Team des „Past Global Changes“-Programms (PAGES) einige interessante Hypothesen: Sind eventuell die dekadischskaligen bis mehrere hundert Jahre dauernden Warmphasen der Klimageschichte das Ergebnis einer relativ konstanten Solaraktivität auf hohem Aktivitätsniveau, gekoppelt mit einer Phase ausbleibender tropischer Vulkanexplosionen? Sind diese wärmeren, ruhigen Phasen so etwas wie Normalperioden des Klimageschehens und weisen diese aufgrund der relativ schwachen Störung der Erdenergiebilanz komplexere Verteilungsmuster der wichtigen Klimaparameter auf als etwa die Kaltphasen? Sind die Letzteren das Ergebnis von Gruppen starker Vulkaneruptionen, die zudem mit solaren Aktivitätsminima gekoppelt sind? Zeigen diese Kaltphasen eventuell klarer strukturierte räumliche Muster als die Warmphasen? Die Kleine Eiszeit lässt zumindest eine solche Vermutung zu.

Der kürzlich verstorbene Klimaforscher Gerard Bond vom Lamont Doherty Earth Observatory in New York hatte aufgrund von Sedimentrückständen im Nordatlantik bereits in den 90er-Jahren postuliert, dass die Eisberge Grönlands in Kühlphasen wie der Kleinen Eiszeit weit nach Süden driften und dort beim Schmelzen Gesteinsspuren des grönländischen Untergrundes ablagern. Verschiedene Forscherinnen und Forscher

der ganzen Erde haben dann in ihren Zeitreihen solche „Bondzyklen“ mit einer Periode von etwa 1500 Jahren gefunden und mit den Temperaturschwankungen im Nordatlantik korreliert. Wir haben diese Zeitreihen überprüft und herausgefunden, dass sich eine generelle globale Übereinstimmung kaum finden lässt (Wanner et al. 2007). Ist es vielleicht so wie die Gruppe um Hans Renssen und Hugues Goosse aus den Niederlanden und aus Belgien mit einem einfacheren Klimamodell aufgezeigt hat? In ihren Simulationen zeigt sich, dass die Kleine Eiszeit sehr wohl „ein Kind“ schwacher Insolation auf der Nordhemisphäre, gekoppelt mit solaren Aktivitätsminima und mehreren großen Vulkanexplosionen war. Mit ihnen können wir spekulieren, dass sich solche Muster über ein Anwachsen der Fläche des arktischen Meereises und die damit verbundene Reduktion der nordatlantischen Tiefenwasserbildung auch global niedergeschlagen haben. Allerdings stellen sich auch hier schwierige Fragen. Führt eine reduzierte Wärmezufuhr Richtung Nordatlantik nicht zu einer stärkeren Erwärmung des tropischen Atlantiks, und wie wirkt sich diese großräumig aus? Oder: Wie lange dauert es, bis sich eine Abkühlung aufgrund des arktischen Meereiswachstums und der damit verstärkten Reflexion der Solarstrahlung global niedergeschlagen hat? Oder: Muss der Auslöser für globale Abkühlungen tatsächlich immer in der Nordhemisphäre und damit im Nordatlantik gesucht werden?

Schließlich verbleibt gemäß Abbildung 2 die Frage nach der Bedeutung der internen Systemvariabilität in Form von ENSO (El Niño Southern Oscillation), NAO (Nordatlantische Oszillation) und andern internen Modi des Klimasystems. Diese beeinflussen mit ihren Quasi-Periodizitäten von 3 bis 7 Jahren beim ENSO und 2,5 sowie 6 bis 10 Jahren beim NAO im kontinentalen (NAO) bis globalen (ENSO) Ausmaß die Temperatur- und Niederschlagsfelder. So werden die stark positiven Anomalien der Erdmitteltemperatur des Jahres 1998 von verschiedenen Forschern zu einem erheblichen Teil dem ENSO zugeschrieben.

4. Der menschliche Fingerprint im Klimasystem

Die Frage nach dem Beginn des menschlichen Fingerprints, das heißt erkennbarer Klimaänderungen aufgrund menschlicher Aktivitäten, hat die Menschheit seit langem beschäftigt. Bill Ruddiman von der Universität Virginia (USA) hat die provozierende Hypothese aufgestellt, ohne die Treibhausgase infolge der Aktivitäten von Bauern der Steinzeit hätte sich

mit Beginn vor etwa 8000 Jahren eine Abkühlung und sukzessive eine neue Eiszeit eingestellt. Diese Hypothese wird von vielen Wissenschaftlern, unter anderem auch von meinem Kollegen Thomas Stocker, bestritten. Modellsimulationen „sehen“ keinen Aufbau kontinentaler Eisschilder. Eine Betrachtung von Abbildung 6 deutet vielmehr darauf hin, dass die globalen Mitteltemperaturen der letzten Jahrzehnte trotz der relativ tiefen, erdbahnbedingten Einstrahlung zur Zeit des borealen Sommers vor allem wegen der stark zunehmenden Treibhausgase (auf Abbildung 6 ist das CO₂ dargestellt) sukzessive zunehmen. Interessant ist dabei auch die Beobachtung, dass – möglicherweise entgegen früherer Zeiten – positive Indizes der Nordatlantischen Oszillation (d. h. starke Winterwesterlies) gleichzeitig mit einer verstärkten ENSO-Aktivität auftreten.

5. Schlussfolgerungen

Wir haben gezeigt, dass der Klimawandel der letzten 6000 Jahre auf der Zeitskala von Jahrtausenden stark durch die Schwankungen der Erdbahnparameter Exzentrizität, Schiefe der Erdachse und Präzession (sogenanntes Milankovitch-Forcing) mitbestimmt wird. Das sommerliche Einstrahlungsmaximum hat sich in dieser Zeit von der Nord- auf die Südhalbkugel verlagert, was zu einer Verschiebung der Zirkulations- und Klimagürtel führte. Auf der dekadischen bis säkularen Skala sind in den rekonstruierten Datenreihen gewisse Quasiperiodizitäten erkennbar. Diese sind jedoch zeitlich und räumlich selten gleichläufig. Damit muss die Existenz globalskaliger Warm- oder Kaltzeiten von der Dauer von mehreren Jahrhunderten in Frage gestellt werden. Modellrechnungen lassen es als möglich erscheinen, dass der starke Einfluss zum Beispiel von solaren Aktivitätsminima, kombiniert mit Gruppen von tropischen Vulkanexplosionen, zu längeren Abkühlungsphasen in Form der Kleinen Eiszeit zwischen 1350 und 1860 AD führen kann. Wärmere Phasen können in Einzelfällen eventuell der Ausdruck einer höheren Solaraktivität und ausbleibender Vulkaneruptionen sein. Das anthropogene Signal wird nach der Meinung vieler Experten erst in den letzten Dekaden mit dem deutlichen Anstieg der Treibhausgase klar sichtbar.

Literaturverzeichnis

- Behre, K.-E. (2003): Eine neue Meeresspiegelkurve für die südliche Nordsee. Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet 28, 63 S.
- Furrer, G. (2001): Alpine Vergletscherung vom letzten

Hochglazial bis heute. Abhandlungen der Math.-naturw. Klasse der Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz, Nr. 3, 49 S.

- Hormes, A. et al. (2001): The Alps with little ice: evidence for eight Holocene phases of reduced glacier extent in the Central Swiss Alps. *The Holocene* 11, 255-265.
- Jörin, U. et al. (2006): Multi-century glacier fluctuations in the Swiss Alps during the Holocene. *The Holocene* 16, 697-704.
- Nicolussi, K. und Patzelt, G. (2000): Untersuchungen zur holozänen Gletscherentwicklung von Pasterze und Gepatschferner (Ostalpen). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 36, 1-87.
- Trachsel, M. (2005): Das Klima der Alpen 4000 bis 1000 BC. Seminararbeit Geographisches Institut Bern.
- Wanner, H. et al. (2007): Mid to late Holocene climate change – a comprehensive review. In revision.

Verdankungen

Ich bedanke mich ganz herzlich bei

- Andreas Brodbeck und Marcel Küttel für die Reinzeichnung der Figuren
- Marco Stössel für Korrekturlesung und Layout